中国生态农业学报 2017 年 9 月 第 25 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2017, 25(9): 1381−1391

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170147

吴昊玥, 何艳秋, 陈柔. 中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究——基于 SBM-Undesirable 模型与面板单位根检验[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1381−1391

Wu H Y, He Y Q, Chen R. Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM-Undesirable model and panel unit root test[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1381−1391

中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究*
——基于 SBM-Undesirable 模型与面板单位根检验

吴昊玥, 何艳秋**, 陈 柔

(四川农业大学管理学院 成都 611130)

摘 要: 当前, 全局层面及工业视角下的碳排放绩效评价和收敛性分析已趋于成熟, 但农业碳排放方面的研究尚十分薄弱。为补充相关研究, 对区域农业碳排放总量、绩效及两者的收敛趋势有更清晰的认识, 本文在测算 2000—2014 年我国 30 个省市农业碳排放总量的基础上, 运用 SBM-Undesirable 模型计算农业碳排放绩效, 并通过面板单位根检验方法对全国和各区域的农业碳排放总量及绩效进行了随机性收敛检验。结果显示: 1) 2000—2014 年间, 全国农业碳排放量整体呈递增趋势, 但各区域排放量差异明显。比较中部与全国、东部和西部各年总量均值, 发现 2000 年的差值分别为 $3.357\ 4\times10^{6}$ t, $3.965\ 0\times10^{6}$ t 和 $5.904\ 7\times10^{6}$ t, 到 2014 年, 差距扩大至 $5.244\ 8\times10^{6}$ t, $7.351\ 2\times10^{6}$ t 和 $7.681\ 0\times10^{6}$ t, 对应增长比例分别为 56.2%、85.4%和 30.0%。2)各区域农业碳排放绩效存在显著差异。绩效均值折线图显示, 东部平均绩效较高, 15 年来基本稳定在 0.8 左右; 西部和中部绩效均值较低, 绝大多数年份处于 0.3~0.5, 但西部不断改善, 中部则持续下降。3)对总量进行收敛性检验, 发现全国、西部、中部呈现明显的随机性分异, 仅东部出现随机性趋同; 在绩效的收敛性检验中, 全国范围内不存在随机性收敛, 但东部、中部、西部各自呈俱乐部式随机性收敛态势。随机性收敛检验结果表明, 中国农业碳排放总量和绩效不会自动降低到稳态水平, 有必要进行相关政策干预, 以缩小各省市间的差距。本研究为制定区域间差异化和区域内统一性农业减排政策奠定了基础。

关键词: 农业碳排放; 碳排放绩效; SBM-Undesirable 模型; 面板单位根; 随机性收敛; 俱乐部收敛
中图分类号: F323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)09-1381-11

Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM-Undesirable model and panel unit root test*

WU Haoyue, HE Yanqiu**, CHEN Rou

(College of Management, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: On overall scale and industrial perspective, researches on the evaluation of carbon emissions and the test of convergence in China have matured. However, the study has remained relatively weak in agricultural carbon emissions. To complement not only existing research but also for better understanding of the carbon emissions, performance and convergence in different regions, the paper used SBM-Undesirable model to assess the performance of agricultural carbon emissions based on the estimation of agricul-

---

* 国家社会科学基金项目(16CJL35)和四川省社科规划项目统计发展专项(17TJ053)资助
** 通讯作者: 何艳秋, 主要从事环境经济、经济统计研究。E-mail: linxiatingqiu@126.com
吴昊玥, 主要从事农业经济管理与农业碳排放研究。E-mail: tsuki710064315@163.com
收稿日期: 2017-02-22 接受日期: 2017-05-05

* This study was supported by the Philosophy and Social Science Foundation of China (16CJL35) and the Social Science Statistical Development Project of Sichuan (17TJ053).
** Corresponding author, E-mail: linxiatingqiu@126.com
Received Feb. 22, 2017; accepted May 5, 2017

tural carbon emissions in 30 provinces in 2000–2014. Then three panel unit root tests were selected to determine stochastic convergence test for the investigated districts. The main conclusions were as follows: 1) for the period 2000–2014, the overall trend in national agricultural carbon emissions increased, but the quantities of the emissions in different regions were significantly different. The mean agricultural carbon emission in the middle region was much larger than that in the whole nation, the eastern region and western region. The gaps in agricultural carbon emissions between the middle region and the whole nation, the eastern and western region were 3.357 4×10^6 t, 3.965 0×10^6 t and 5.904 7×10^6 t respectively in 2000, whereas this gaps widened to 5.244 8×10^6 t, 7.351 2×10^6 t and 7.681 0×10^6 t in 2014, corresponding respectively to growth rates of 56.2%, 85.4% and 30.0%. 2) The performance of agricultural carbon emissions in different regions turned out to differ apparently from distinct to district. A line graph of the average performance suggested that the performance was better for the eastern region, which was stable at 0.8 for 15 years. On the contrary, the average performance was relatively low for the west and middle regions, which was for most of the time within 0.3–0.5. The performance improved for the western region. However, the trend for the middle region was apparently the reverse. 3) In terms of convergence test of quantity, the examination of simulated convergence confirmed that stochastic convergence occurred only for the eastern region. There was no sign that stochastic convergence existed for the whole country, western region or even middle region. In the test of performance, there was no stochastic convergence for the whole country, while three regions exhibited relatively obviousness in the trend in club convergence. The results suggested that neither the quantity nor the performance of the whole country was automatically reducible to steady-state level. Thus it was necessary to make effective policy intervention to narrow the gap among the regions. Finally, this paper provided a further data-driven reference base for developing reasonable policies for the reductions of regional and national carbon emissions.

Keywords: Agricultural carbon emission; Carbon emission performance; SBM-Undesirable model; Panel unit root; Stochastic convergence; Club convergence

科学研究显示，地球表面年平均气温在近百年内上升了约 0.6 ℃，而当气温上升 5~6 ℃时，地球将面临彻底的灾难。大气中 CO_2 等温室气体的浓度升高是导致气温上升的重要因素，因此，碳排放成为全世界关注的焦点问题之一。中国承诺：到 2030 年单位 GDP 的碳排放要比 2005 年下降 60%~65%，这就要求各产业大力减排。尽管二、三产业是碳排放的主导部门，然而大量农用柴油以及化肥农药的使用，使得农业对碳排放的影响也不容小觑：近年来农业碳排放占碳排放总量的比例已上升至 17%[1]，远高于国际平均水平，可见控制农业碳排放刻不容缓。在这样的现状下，研究中国农业碳排放收敛性问题，可为科学制定与实施区域农业减排政策、实现可持续发展提供重要依据。

随着低碳经济探索的深入，国内外学者针对碳排放收敛性问题开展了广泛研究。Strazicich 和 List[2] 利用 IPS 面板单位根检验方法研究了 21 个工业化国家 1960—1997 年的碳排放随机性收敛，指出这些国家的人均碳排放存在收敛态势。Westerlund 和 Basher[3]也认为 OECD 国家的碳排放收敛趋势存在，但 Lee 等[4]认为其中仅有 4 个国家存在收敛。许广月[5]同样以人均碳排放量为研究对象，用中国 1995—2007 年的省际面板数据进行实证，发现中国人均碳排放量存在 β 条件收敛和东、中、西部俱乐部收敛，不存在 β 绝对收敛，但高广阔等[6]认为我国省区人均碳排放量普遍存在绝对收敛和条件收敛，不存在俱乐部收敛。

纵观国内外，对碳排放收敛性的研究主要集中于全局和工业视角，针对农业碳排放收敛的研究部分相当薄弱，目前相关研究屈指可数。高鸣等[7]使用 ML 指数、空间 Morans'I 指数和 3 种收敛性模型分析了中国 1999—2010 年农业碳排放绩效的空间聚集与收敛等问题，发现中国农业碳排放绩效存在“俱乐部收敛”效应，即碳排放绩效水平和外界影响因素类似的地区，其碳排放将收敛于统一稳态水平；随后，杨秀玉[8]运用泰尔指数及其分解方法，测度了 1993—2011 年中国农业碳强度分布的地区差异，结果显示不存在 σ 收敛和条件 β 收敛，即不同地区间的碳排放差异不会随时间推移而逐渐减小；程琳琳等[9]利用核密度函数、收敛理论及空间计量方法对 1997—2012 年中国 31 个省区的农业碳生产率分布收敛趋势、聚类状况以及俱乐部特征进行了研究，认为东西部存在较为明显的 σ 收敛现象，但整体不存在 σ 收敛。

就已有的农业碳排放收敛性研究而言，几位学者分别从农业碳排放的绩效、强度、生产率 3 个角度进行了收敛性探究，但由于在收敛检验方法、指标选择、样本数据等方面存在差异，对收敛性的检验并未取得一致结论，并且检验方法仅限于 α、β、俱乐部检验这 3 种传统的截面和面板回归收敛检验方法，在实际应用中，β 收敛不能表明收敛或不平衡的动态过程[10]；而且 β 收敛检验主要是采用横

截面数据，横截面收敛检验具有不理想的规模性质，经常拒绝非收敛假说，从而使检验结果出现偏差[11-13]，存在一定局限。因此，本文采用随机性收敛检验作为研究方法，区别于传统收敛检验，随机性收敛检验是一种改进的、基于面板数据单位根检验的方法，由于面板数据比时间序列数据有更多变异性，包含更多信息，可以弥补单纯使用时间序列或截面数据研究的不足。在测算中国 2000—2014 年 30 个省市(港、澳、台、西藏除外)农业碳排放总量的基础上，本文运用 SBM-Undesirable 模型计算农业碳排放绩效，进而采用面板单位根检验方法分别对总量和绩效进行随机性收敛检验，以期为合理制定区域性和全国协调性的农业碳减排政策提供一定参考。

1　研究方法与数据处理

1.1　农业碳排放总量计算

参考现有农业碳排放总量测算研究的做法[14-15]，一般将农业碳排放源分为 3 个部分：一是农地利用导致的碳排放，包括化肥、农药、农膜等农用物质投入引发的碳排放，农用机械使用耗费柴油引起的碳排放，翻耕破坏土壤表层而导致的有机碳流失以及灌溉过程中电能利用间接耗费化石燃料所形成的碳释放；二是水稻生长发育过程中产生甲烷等温室气体引起的碳排放；三是反刍动物养殖带来的碳排放，包括肠道发酵和粪便管理所引起的甲烷排放。农业碳排放总量为各碳源所导致的碳排放量总和，表 1 列出了各碳源碳排放系数。

表 1　农业碳排放源所对应碳排放系数

Table 1　Carbon emission coefficients of different agricultural carbon emission sources

农地利用与水稻 Farming land utilization and rice	碳排放系数 Coefficient of carbon emission	参考来源 Reference source	反刍动物 Ruminant	肠道发酵 Intestinal fermentation [kg(C)·head^{-1}·a^{-1}]	粪便管理 Feces management [kg(C)·head^{-1}·a^{-1}]	参考来源 Reference source
化肥 Fertilizer	0.895 6 kg(C)·kg^{-1}	West 等[16]；美国橡树岭国家实验室 West, et al. [16]; Oak Ridge National Laboratory	奶牛 Dairy cow	416.02	122.76	IPCC[17]
农药 Pesticide	4.934 1 kg(C)·kg^{-1}	美国橡树岭国家实验室 Oak Ridge National Laboratory	水牛 Buffalo	375.10	13.64	IPCC[17]
农膜 Mulching film	5.18 kg(C)·kg^{-1}	南京农业大学农业资源与生态环境研究所 Agricultural Resources and Ecological Environment Institute of Nanjing Agricultural University	其他牛 Other cows	320.54	6.82	IPCC[17]
柴油 Diesel	0.592 7 kg(C)·kg^{-1}	IPCC[17]	马 Horse	122.76	11.18	IPCC[17]
农业灌溉 Agricultural irrigation	266.48 kg(C)·hm^{-2}	West 等[16] West, et al. [16]	驴 Donkey	68.20	6.14	IPCC[17]
翻耕 Ploughing	312.6 kg(C)·hm^{-2}	中国农业大学生物与技术学院 College of Biology and Technology of China Agricultural University	骡 Mule	68.20	6.14	IPCC[17]
早稻 Early rice	11.941 8 kg(C)·hm^{-2}	闵继胜等[18] Min J S, et al. [18]	猪 Pig	6.82	27.28	IPCC[17]
中季稻 Middle-season rice	176.072 kg(C)·hm^{-2}	闵继胜等[18] Min J S, et al. [18]	山羊 Goat	34.10	1.16	IPCC[17]
晚稻 Late rice	26.598 kg(C)·hm^{-2}	闵继胜等[18] Min J S, et al. [18]	绵羊 Sheep	34.10	1.02	IPCC[17]

1.2　考虑非期望产出的 SBM 模型

1.2.1　模型介绍

对于碳排放绩效的测算，主流方法为数据包络分析(DEA)方法，它能同时处理涉及多项内容的投入与产出评价问题，没有预设生产函数和参数的困难，并且，通过数学规划产生投入、产出的权重，消除主观因素影响，能保证评价的客观公正。

传统 DEA 对于效率评价的原则是利益最大化，也就是用尽可能最小的投入获得最大的产出。但是，在提倡低碳型社会的背景下，农业生产过程包含不期望产生的碳排放这一副产品，即非期望产出。Tone[19-20]提出了基于非径向和非角度的模型 SBM，在其基础上发展起来的 SBM-Undesirable 模型是一种既能包含期望产出，又能包含非期望产出的测算模型。由于在 VRS 和 CRS 的不同假设前提下测算结果不相同，借鉴王兵等[21]的处理方法，本研究采用基于 VRS 假设下的 SBM-Undesirable 模型进行农业碳排放绩效测算。

该模型假设生产系统有 n 个决策单元(DMU)，每个特定的决策单元都有 3 方面的要素，即投入、

期望产出与非期望产出，分别表示为 $x \in R_+^m$、$y^g \in R_+^{s_1}$ 和 $y^b \in R_+^{s_2}$，则可以定义 3 个矩阵 $\boldsymbol{X}=[x_1,\dots,x_n] \in R_+^{m\times n}$、$\boldsymbol{Y}^g=[y_1^g,\dots,y_n^g] \in R_+^{s_1\times n}$ 和 $\boldsymbol{Y}^b=[y_1^b,\dots,y_n^b] \in R_+^{s_2\times n}$，且满足 $\boldsymbol{X}>0$，$\boldsymbol{Y}^g>0$，$\boldsymbol{Y}^b>0$，那么生产可能集可以表示为:

$$P=\{(x,y^g,y^b) \mid x \geqslant X\lambda, y^g \leqslant Y^g\lambda, y^b \geqslant Y^b\lambda, \lambda \geqslant 0\} \quad (1)$$

式中，λ 是 R_+^n 上的一个非负权重向量。包含非期望产出的、规模报酬可变的 SBM-Undesirable 模型可以表示为下述线性规划问题:

$$\rho^*=\min \frac{1-\dfrac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\dfrac{s_i^-}{X_{i0}}}{1+\dfrac{1}{s_1+s_2}\left(\sum_{r=1}^{s_1}\dfrac{s_r^g}{y_{r0}^g}+\sum_{i=1}^{s_2}\dfrac{s_r^b}{y_{r0}^b}\right)} \quad (2)$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} x_0=X\lambda+s^- \\ y_0^g=Y^g\lambda-s^g \\ y_0^b=Y^b\lambda+s^b \\ s^-\geqslant 0, s^g\geqslant 0, s^b\geqslant 0, \lambda\geqslant 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: s^-、s^g 和 s^b 表示投入、期望产出及非期望产出的松弛变量，为权重向量；ρ^* 为目标函数值；y_0^g 和 y_0^b 分别表示投入期望产出和非期望产出。ρ^* 关于 s^-、s^g 和 s^b 严格单调递减，且 $0\leqslant\rho^*\leqslant 1$。当 $\rho^*=1$，即 $s^-=0$，$s^g=0$ 且 $s^b=0$ 时，决策单元有效；当 $\rho^*<1$ 时，决策单元无效，此时有必要对投入产出进行改进。

1.2.2 指标选择与数据处理

所有数据均来源于历年的《中国统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》、各省统计局所公布数据和《改革开放三十年农业统计资料》，不考虑港、澳、台地区，由于西藏地区数据缺失较多，也不计入测算范围。经整理，形成 2000—2014 年中国大陆 30 个省市的面板数据。

在已有研究和测算结果的基础上，结合经济学中的三大生产要素投入考虑，本文将农业生产活动中的投入分为劳动投入、土地投入、资本投入和其他投入 4 部分，而产出则分为期望产出和非期望产出(表 2)。

其中，资本投入指标不能直接获得，在农业资本投入的数据处理上，本文借鉴王金田等[22]的方法，沿用永续盘存法，选取严格意义上的不包含人力和土地的纯物质资本。其计算公式为:

$$K_{it}=(1-\delta)K_{it-1}+I_{it} \quad (4)$$

式中: K_{it} 为第 i 个省(市)当期的农业固定资本存量，K_{it-1} 为上期农业固定资本存量，I_{it} 为当期的农业固定资产投资额，δ 为折旧率。农业资本投入单位为亿元。为了使各年农业资本投入和农业增加值具有可比性，本文对数据进行了平减处理，以剔除价格等因素的干扰，将各年对应值折算成以 2000 年可比价格计算的实际值作为期望产出变量。

表 2 农业碳排放绩效评价投入产出指标

Table 2 Indexes of input and output in the evaluation about the performance of agricultural carbon emissions

投入指标 Input index		产出指标 Output index	
劳动投入 Labor	农林牧渔从业人数 Agricultural workers (×10^4 person)	期望产出 Expected	农林牧渔增加值 Added value of agriculture (×10^8 ¥)
土地投入 Land	耕地面积 Arable land (×10^3 hm^2)	非期望产出 Unexpected	农业碳排放量 Agricultural carbon emissions (×10^4 t)
资本投入 Capital	农业资本投入 Capital investment (×10^8 ¥)		
其他投入 Other	化肥施用量 Quantity of fertilizer (×10^4 t)		

1.3 随机性收敛检验

本文采用的随机收敛检验的框架来源于 Evans 等[11]，其基本思路为：假设存在 1, 2, ⋯, N 个地区，而这 N 个地区之间存在趋同现象，当且仅当共同趋势 a_t 和参数 $\mu_1,\mu_2,\cdots,\mu_n$ 存在，以使下式成立:

$$\lim_{k\to 0} E_t(y_{i,\ t+k}-a_{t+k})=\mu_i \ (i=1,\ 2,\cdots,N) \quad (5)$$

式中: $y_{i,t}$ 是第 i 个地区碳排放绩效，a_t 是地区共同趋势。如果按两两配对的方式进行随机性收敛检验，在时间跨度较短的影响下，单变量单位根检验存在“势”值过低的问题，使得单位根检验的结果可靠性降低。对于这 N 个地区，对式(5)进行平均得到式(6):

$$\lim_{k\to 0} E_t(\overline{y}_{t+k}-a_{t+k})=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mu_i \quad (6)$$

$$\overline{y}_t=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}y_{it} \quad (7)$$

由于公式(5)、公式(6)中的 a_t 不能通过观测得到，故通过式(5)减去式(6)，将 a_t 剔除，得到式(8)：

$$\lim_{k \to 0} E_t(y_{i,t+k} - \overline{y}_{t+k}) = \mu_i - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mu_i \tag{8}$$

当且仅当 $1, 2, \cdots, N$ 地区，存在 $(y_{i,t+k} - \overline{y}_{t+k})$ 是平稳序列时，N 个地区之间存在收敛。$(y_{i,t+k} - \overline{y}_{t+k})$ 是否是平稳序列，通过式(9)中的自回归参数 β_i 检验。

$$\Delta\left(y_{i,t} - \overline{y_t}\right) = \delta_i + \beta_i\left(y_{i,t-1} - \overline{y}_{t-1}\right) + \sum_{K=1}^{K_t}\varphi_{i,k}\Delta\left(y_{i,t-k} - y_{t-k}\right) + \mu_{i,t} \quad (i = 1, 2, \cdots, N; t = 1, 2, \cdots, T) \tag{9}$$

式中，i、t、δ_i 表示区域效应，参数 φ 使得 $\varphi_{i,k}L^i$ 的所有单位根处于单位圆之外，L 表示滞后算子，假定在 $N \to \infty$，式(9)中所有的 μ 在 $1, 2, \cdots, N$ 地区间都不存在相关关系。应用面板单位根检验方法，检验所有面板数据 $(y_{i,t} - \overline{y}_t)$ 序列是否平稳从而检验所有地区是否随机收敛。当 $\beta_i = 0$ 时，$(y_{i,t+k} - \overline{y}_{t+k})$ 为平稳序列，产出差距 $(y_{i,t} - \overline{y}_t)$ 服从平稳随机过程，表明所有地区存在趋同均衡水平移动，对 i 地区的外生冲击就是暂时的，地区间碳排放绩效存在随机性趋同；如果 $\beta_i \neq 0$，则包含单位根过程产出，外生冲击就会持续积累，最终使各地区的碳排放绩效呈随机发散。

2　结果与分析

2.1　农业碳排放总量的测算结果及分析

为了分析中国农业碳排放绩效的变化情况，本文根据前文所述公式，使用 2000—2014 年的各省对应数据计算出农业碳排放总量。同时，根据经济结构、地理位置等因素，将全国分为东、西、中部 3 个区域，为便于将各区域农业碳排放情况进行对比，再进一步计算各区域碳排放总量均值，即各区域碳排放总量除以各区域包含的省市个数。结果如表 3 所示。

表 3　2000—2014 年全国及 3 区域农业碳排放量均值

Table 3　Average of agricultural carbon emissions of the whole nation and three regions in 2000–2014

年份 Year	东部 East		中部 Middle		西部 West		全国 National	
	数值 Value ($\times 10^4$ t)	环比增长速度 Chain base growth rate (%)	数值 Value ($\times 10^4$ t)	环比增长速度 Chain base growth rate (%)	数值 Value ($\times 10^4$ t)	环比增长速度 Chain base growth rate (%)	数值 Value ($\times 10^4$ t)	环比增长速度 Chain base growth rate (%)
2000	843.652	—	1 240.153	—	649.684	—	904.412	—
2001	835.380	−0.98	1 221.300	−1.52	652.901	0.50	896.413	−0.88
2002	827.895	−0.90	1 233.370	0.99	657.733	0.74	898.489	0.23
2003	811.014	−2.04	1 214.075	−1.56	662.550	0.73	887.393	−1.23
2004	843.368	3.99	1 314.002	8.23	679.109	2.50	935.281	5.40
2005	855.973	1.49	1 346.328	2.46	700.185	3.10	956.343	2.25
2006	786.341	−8.13	1 322.640	−1.76	654.224	−6.56	907.596	−5.10
2007	784.219	−0.27	1 340.106	1.32	654.627	0.06	912.107	0.50
2008	778.156	−0.77	1 371.348	2.33	668.701	2.15	923.277	1.22
2009	782.690	0.58	1 407.749	2.65	683.776	2.25	940.533	1.87
2010	783.604	0.12	1 435.911	2.00	689.409	0.82	951.038	1.12
2011	783.917	0.04	1 451.916	1.11	699.713	1.49	959.056	0.84
2012	784.218	0.04	1 471.322	1.34	710.999	1.61	968.383	0.97
2013	780.691	−0.45	1 490.663	1.31	722.993	1.69	976.373	0.83
2014	774.311	−0.82	1 509.434	1.26	741.332	2.54	984.954	0.88
均值 Average	803.695	—	1 358.021	—	681.862	—	933.443	—
年均增长率 Annual growth rate (%)	−0.32	—	0.61	—	0.32	—	0.21	—

东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、山东、江苏、浙江、上海、福建、广东、海南和广西，西部地区包括四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆和西藏，中部地区包括山西、内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北和湖南。The eastern region consists of Beijing, Tianjin, Hebei, Liaoning, Shandong, Jiangsu, Zhejiang, Shanghai, Fujian, Guangdong, Hainan and Guangxi. The western region includes Sichuan, Guizhou, Yunnan, Shaanxi, Gansu, Qinghai, Ningxia, Xinjiang and Tibet. The middle region includes Shanxi, Inner Mongolia, Jilin, Heilongjiang, Anhui, Jiangxi, Henan, Hubei, and Hunan.

表 3 展示了全国和东、中、西部三大区域农业碳排放总量均值的演变趋势。可以发现：

1)2000—2014 年，全国农业碳排放量整体呈现递增趋势。以 2000 年为基期，全国和东、中、西部

三大区域农业碳排放总量均值年均增长率分别为 0.21%、–0.32%、0.61%和 0.32%。除东部农业碳排放总量均值整体呈现逐渐下降趋势外，西部和中部的碳排放量均呈现增长趋势，且中部环比增长速度、年均增长速度均为最大。

2)环比增长速度显示，2000—2003 年，3 个区域的农业碳排放量增长较缓，通过汇总计算这 4 年农业碳排放源的原始数据发现：自 2000 年以来，农地利用各类碳源引发的碳排放逐年减少，可能是由于“三农”问题进一步凸显，农业生产活动受到影响，农地利用造成的碳排放在一定程度上被抑制。到了 2004 年，全国和 3 个区域的碳排放总量均值增长率较高，是由于 2004 年中央一号文件的惠农政策极大刺激了农民的农业生产积极性，农地利用、水稻种植等活动导致的农业碳排放不断增加；2006 年，全国和 3 个区域的碳排放总量均值大幅度下降，从各农业碳排放源寻找原因，发现全国绝大多数省市牛、猪、马等各类反刍动物的养殖规模比 2005 年缩减较多，尤其是从全国总量而言，牛、猪的养殖数量比 2005 年分别减少 25.5%和 16.9%，农药化肥施用规模也在一定程度上比上年缩减，据推测是由于“十一五”规划期间制定实施了节能减排强制措施，再加上农民的环保意识增强，农药化肥施用量相对减少，但偶尔也存在反弹现象。

3)从截面角度来看，各区域的农业碳排放量差异十分明显，中部每年的农业碳排放总量均值都远远大于全国、东部和西部。2000 年，中部与全国、东部和西部农业碳排放总量的均值相比，差值分别为 335.741 万 t、396.501 万 t、590.469 万 t，到 2014 年差值扩大至 524.480 万 t、735.123 万 t、768.102 万 t，对应差值的增长比例分别为 56.2%、85.4%和 30.0%，中部与东部农业碳排放总量的均值差距呈现出更加明显的扩大趋势。再将东部与西部、全国的农业碳排放量均值进行比较，发现东部农业碳排放量在 2000 年比全国均值少 60.76 万 t，比西部均值多 193.968 万 t，在 2014 年比全国均值少 210.643 万 t，比西部均值多 32.979 万 t，这是由于东部农业碳排放量在逐渐减少，而西部的农业碳排放量在缓慢增加，则东西间的差距在不断缩小，但环比增长速度显示，两者最终不会趋近于同一水平，很有可能短暂地处于同一碳排放水平后再次趋异，呈现出西部农业碳排放量逐渐高于东部的特征。

2.2 农业碳排放绩效的测算结果及分析

在计算出农业碳排放量并进行简要分析的基础上，为进一步探究我国农业碳排放的绩效情况，本文利用 DEA Solver pro 5.0 软件，选用 VRS 假设下的 SBM-Undesirable 模型测算中国各地区的农业碳排放绩效，具体结果如表 4 所示。

结果显示，30 个省市中共有 7 个省市超过半数的年份碳排放绩效位于生产前沿面上，说明相对于其他地区而言，这 7 个地区的投入产出基本已达到最优水平，在农业发展的同时有效地兼顾了碳排放的控制。其中，现代农业较为发达地区的农业碳排放绩效较高，如上海、北京、江苏、浙江、福建 5 个地区。海南省农业碳排放绩效一直为 1.000，青海自 2007 年起也一直保持 1.000 的绩效值，虽然这两个省份的现代农业尚处于发展中阶段，但相对效率的测算是从规模和技术两个角度进行比较而得出绩效值，因此，海南和青海等地碳排放绩效相对其自身实现了有效。

其余 23 个无效省市中，山东、河北和辽宁农业碳排放绩效值基本保持在 0.5~1，说明农业碳排放投入产出方面再进行一些改进，即可实现有效；不过农业大省山东自 2008 年起碳排放绩效就稳定在 1.000，其发展趋势较好。相比之下，云南、四川、新疆、湖北、湖南、江西等地区农业碳排放绩效稍差一些，大多数年份都在 0.3~0.6 间波动，农业碳排放绩效具有较大改进空间。

绩效值排在最末的 3 个省市是宁夏、山西和甘肃，宁夏所有年份对应的农业碳排放绩效都小于 0.3，山西和甘肃也有过半数年份农业碳排放绩效不足 0.3，处于较低水平，属于碳排放绩效非有效地区，需要改变投入和产出来推动农业碳排放绩效达到有效状态。对 2000—2014 年各省市的绩效值取算术平均，发现北京、天津、海南、青海等 12 个省市的农业碳排放绩效处于全国平均水平以上，而四川、贵州、云南、陕西、吉林、黑龙江等 18 个省市的绩效值均在全国平均水平之下。也就是说，农业碳排放整体绩效较优的省份基本属于东部地区，而绩效值较差的省份绝大多数来自西部或中部。

可见，不同省份的农业碳排放绩效存在一定的差异。那么，在全国和区域两个视角下，农业碳排放绩效值是否存在较大差距？为了对各地区碳排放绩效水平和区域间差异有一个直观而又形象的认识，本文用各年份对应的 3 个区域与全国各自的平均绩效值绘制了折线图，见图 1。

从图 1 可以看出，东、中、西部之间的农业碳排放绩效确实存在差异，且差距格局在这 15 年间基

表 4　中国 2000—2014 年各地区农业碳排放绩效
Table 4　Regional agricultural carbon emissions performance in 2000–2014

决策单元(DMU) Decision making unit		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
东部地区 Eastern region	上海 Shanghai	0.555	0.548	0.553	1.000	0.852	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.547	0.449	0.510
	北京 Beijing	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	天津 Tianjin	0.786	0.760	0.738	1.000	0.767	0.796	0.662	0.619	0.482	0.480	0.446	0.393	0.390	0.426	0.436
	山东 Shandong	0.572	0.537	0.499	0.567	0.605	0.608	0.630	0.744	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	广东 Guangdong	1.000	1.000	1.000	1.000	0.761	1.000	1.000	1.000	0.731	0.750	0.616	0.569	0.590	0.557	0.598
	广西 Guangxi	0.494	0.508	0.492	1.000	0.562	0.460	0.488	0.499	0.425	0.406	0.359	0.354	0.358	0.333	0.346
	江苏 Jiangsu	0.793	0.821	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	河北 Hebei	0.529	0.537	0.513	0.529	0.572	0.488	0.491	0.635	0.696	0.769	0.863	0.925	1.000	1.000	0.753
	浙江 Zhejiang	0.706	1.000	0.750	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	海南 Hainan	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	福建 Fujian	1.000	1.000	0.803	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	辽宁 Liaoning	1.000	1.000	1.000	0.761	0.811	0.776	0.690	0.785	1.000	1.000	0.730	0.641	0.685	1.000	0.678
西部地区 Western region	云南 Yunnan	0.310	0.306	0.285	0.379	0.395	0.360	0.372	0.372	0.313	0.307	0.245	0.276	0.314	0.281	0.282
	四川 Sichuan	0.553	0.574	0.549	1.000	1.000	0.589	0.553	0.639	0.495	0.466	0.414	0.432	0.464	0.428	0.442
	宁夏 Ningxia	0.291	0.294	0.257	0.221	0.210	0.209	0.204	0.223	0.215	0.235	0.241	0.228	0.232	0.236	0.236
	新疆 Xinjiang	0.538	0.473	0.453	0.587	0.533	0.524	0.458	0.508	0.430	0.470	1.000	0.424	0.457	0.484	0.482
	甘肃 Gansu	0.349	0.368	0.324	0.316	0.351	0.322	0.297	0.328	0.289	0.293	0.279	0.260	0.282	0.273	0.267
	贵州 Guizhou	0.286	0.290	0.264	0.379	0.381	0.342	0.361	0.415	0.321	0.303	0.268	0.246	0.334	0.319	0.397
	重庆 Chongqing	0.731	1.000	0.701	0.574	0.557	0.493	0.340	0.411	0.358	0.345	0.316	0.320	0.339	0.347	0.353
	陕西 Shaanxi	0.289	0.289	0.269	0.284	0.347	0.358	0.353	0.427	0.515	0.402	0.485	0.557	0.518	0.536	0.547
	青海 Qinghai	0.292	0.325	0.318	0.362	1.000	0.417	0.352	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
中部地区 Middle region	内蒙古 Inner Mongolia	0.727	0.696	0.620	0.494	0.466	0.431	0.387	0.425	0.388	0.367	0.349	0.347	0.354	0.348	0.321
	吉林 Jilin	1.000	1.000	1.000	0.551	0.492	0.474	0.466	0.481	0.438	0.468	0.380	0.368	0.385	0.353	0.339
	安徽 Anhui	0.408	0.412	0.374	0.408	0.498	0.391	0.368	0.408	0.322	0.341	0.309	0.294	0.302	0.278	0.284
	山西 Shanxi	0.270	0.252	0.259	0.334	0.391	0.309	0.269	0.264	0.191	0.347	0.328	0.261	0.253	0.252	0.251
	江西 Jiangxi	0.458	0.474	0.453	0.540	0.498	0.436	0.442	0.492	0.408	0.393	0.344	0.332	0.340	0.339	0.353
	河南 Henan	0.519	0.517	0.441	0.352	0.481	0.490	0.432	0.433	0.357	0.357	0.337	0.295	0.311	0.297	0.289
	湖北 Hubei	0.533	0.538	0.460	0.570	0.612	0.564	0.509	0.543	0.496	0.475	0.459	0.461	0.480	0.602	0.585
	湖南 Hunan	0.537	0.591	0.570	0.556	0.481	0.447	0.501	0.601	0.485	0.464	0.404	0.392	0.402	0.378	0.380
	黑龙江 Heilongjiang	0.328	0.369	0.355	0.383	0.356	0.342	0.326	0.357	0.329	0.325	0.289	0.305	0.362	1.000	0.504
东部平均 Average of east		0.786	0.809	0.760	0.905	0.828	0.844	0.830	0.857	0.861	0.867	0.834	0.823	0.798	0.814	0.777
西部平均 Average of west		0.404	0.435	0.380	0.456	0.530	0.402	0.365	0.480	0.438	0.425	0.472	0.416	0.438	0.434	0.445
中部平均 Average of middle		0.531	0.539	0.503	0.465	0.475	0.432	0.411	0.445	0.379	0.393	0.356	0.339	0.354	0.427	0.367
全国平均 National average		0.595	0.616	0.569	0.638	0.633	0.588	0.565	0.620	0.590	0.592	0.582	0.556	0.557	0.584	0.554

本保持稳定。全国的农业碳排放绩效变化不大，基本在 0.6 上下小幅度波动，东部农业碳排放绩效也大体稳定在 0.8 左右，而西部和中部农业碳排放绩效呈现出相反的发展趋势，虽然西部农业碳排放绩效的起点是 3 个区域中最低的，但 15 年来已经有了一定改善，而中部 2000 年的农业碳排放绩效处于东部和西部之间，到 2014 年已降至末位。据实际情况推测，由于我国东部拥有最新农业技术和大量资金投入，有利于在农业生产环节推动碳减排，在农业发展过程中也更加注重资源和环境的保护，发展方式比较持续。而中、西部地区受地形地势和农业科技水平的限制，农业经济发展方式较为粗放，使其

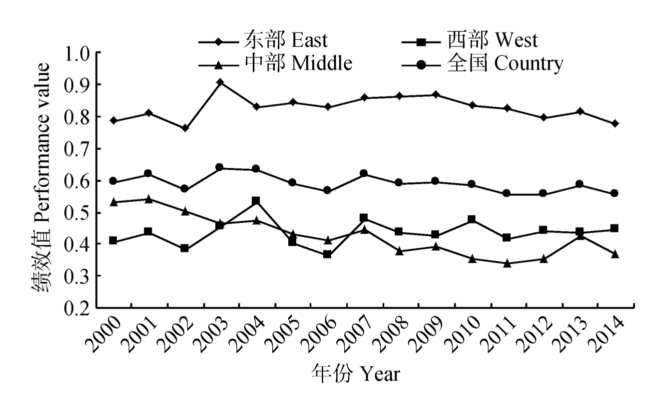


图 1 2000—2014 年 3 个区域与全国的农业碳排放绩效均值折线图

Fig. 1 Line charts about the agricultural carbon emissions average performance of the regions and the whole nation in 2000–2014

农业碳排放量多且绩效值低，并在农业发展过程中造成大量资源消耗和严重环境污染。尤其是中部地区，从近年来的发展趋势来看，如果再不对农业碳排放进行控制的话，其农业碳排放量可能会继续增长。

2.3 随机性收敛检验

从全国和区域两个层面来讲，农业碳排放总量和绩效都存在显著差异。伴随着时间的推移，省市、区域间的空间差异会趋于增大还是缩小?本文使用LLC、ADF-Fisher 和 PP-Fisher 3 种面板单位根检验方法对我国农业碳排放总量和绩效分别进行了随机性收敛检验。首先进行农业碳排放总量随机性收敛检验，参照 Carlino 等[23-24]关于随机性趋同模型的设定，检验过程如下:

第一步，用各省市农业碳排放量减去全国平均值，形成一个差值面板数据，对其进行面板单位根检验，得到全国范围的农业碳排放收敛检验结果;

第二步，对各区域内部进行俱乐部式随机性收敛，把东、中、西各区域所包含省市对应的农业碳排放量减去所在区域的平均值，将形成的 3 个面板数据依次进行检验，得到各区域内部的收敛结果。

如果结果通过了给定显著性水平下的检验，证明面板数据拒绝存在面板单位根的原假设，那么就证明存在随机性趋同。对绩效进行随机性收敛检验的操作与总量随机性收敛检验相似，此处不再赘述。得到的检验结果如表 5、表 6 所示。

2.3.1 总量随机性收敛检验结果分析

首先分析总量的随机性收敛检验结果，LLC、ADF-Fisher 和 PP-Fisher 的原假设均为存在单位根，在全国范围来看，由于仅有 PP-Fisher 检验能在 1%的显著性水平下拒绝原假设，LLC 和 ADF-Fisher 检验中 P 值分别为 0.640 3 和 0.263 8，根据少数服从多数的原则，认为全国农业碳排放总量面板数据存在单位根，即不存在随机性收敛，全国各省市间碳排放量存在较大差距，且不可能自然趋于同一水平。

从区域角度而言，对东部碳排放量进行的LLC、ADF-Fisher 和 PP-Fisher 检验均能在 1%的显著性水平下拒绝存在单位根的假设，证明东部地区农业碳排放量表现出随机性收敛，随着时间推移，东部地区省市之间的农业碳排放量差距能保持一个

表 5 不同区域与全国农业碳排放总量随机性收敛检验结果

Table 5 Stochastic convergence test results of the quantity of agricultural carbon emissions of the regions and the whole nation

区域 Region	面板单位根检验 Panel unit root test					
	Levin, Lin & Chu t*		ADF-Fisher Chi-square		PP-Fisher Chi-square	
	统计量 Statistic	相伴概率 Prob.	统计量 Statistic	相伴概率 Prob.	统计量 Statistic	相伴概率 Prob.
全国 Country	0.359 4	0.640 3	66.476 1	0.263 8	120.370 0	0.000 0
东部 East	–4.117 7	0.000 0	40.761 9	0.017 7	68.073 7	0.000 0
西部 West	1.928 9	0.973 1	13.384 4	0.768 2	13.216 2	0.778 6
中部 Middle	–1.486 8	0.068 5	12.329 8	0.829 8	13.057 9	0.788 1

表 6 不同区域与全国农业碳排放绩效随机性收敛检验结果

Tabel 6 Stochastic convergence test results of the performance of agricultural carbon emissions of the regions and the whole nation

区域 Region	面板单位根检验 Panel unit root test					
	Levin, Lin & Chu t*		AD-Fisher Chi-square		PP-Fisher Chi-square	
	统计量 Statistic	相伴概率 Prob.	统计量 Statistic	相伴概率 Prob.	统计量 Statistic	相伴概率 Prob.
全国 Country	0.147 9	0.558 8	65.734 8	0.131 5	73.573 5	0.039 5
东部 East	–3.179 6	0.000 7	37.670 6	0.001 7	34.599 8	0.004 5
西部 West	–1.036 0	0.150 1	38.762 9	0.003 1	30.826 9	0.030 1
中部 Middle	–4.083 4	0.000 0	36.258 6	0.006 5	42.926 2	0.000 8

相对平稳的变化路径。

西部地区的检验结果中，P 值分别为 0.973 1、0.768 2 和 0.778 6，均不能拒绝原假设。由于云南、甘肃和新疆的农业碳排放量上升较快，分别从 2000 年的 1 135 万 t、355 万 t、417 万 t 增加到 2014 年的 1 305 万 t、568 万 t 和 729 万 t，而其余省市在这 14 年间基本保持稳定的排放量，导致西部区域内部各省市的农业碳排放表现出不同的发展路径，不能构成稳定的差异均衡，所以不存在西部俱乐部式随机性收敛。

中部地区的检验结果与西部地区相似，同样无法在 5%的显著性水平下拒绝原假设。观察中部地区各省市农业碳排放总量，发现山西省基本上每年的排放量保持在 300 万 t 左右，整体趋势较平稳，而其他省市都表现出不同幅度的增长趋势，其中，黑龙江省的增长幅度最大，在 2000 年的农业碳排放量为 1 162 万 t，到 2014 年增加到 2 133 万 t。因此，区域内部不同的发展趋势阻碍了中部随机性收敛俱乐部的形成。

2.3.2　绩效随机性收敛检验结果分析

在绩效的收敛性检验结果中，可以看出：对全国农业碳排放绩效进行 LLC 检验 P 值为 0.147 9，不能拒绝原假设；ADF-Fisher 检验中，P 值也不能拒绝原假设；与 LLC 和 ADF-Fisher 检验结果相反，PP-Fisher 检验结果 P 值能在 5%的显著性水平下拒绝存在单位根的原假设，但由于前两个检验均接受了原假设，故倾向于认为全国农业碳排放绩效不存在随机性收敛，这也与图 1 所示全国和 3 个地区的平均绩效对比图相符，全国、东部、西部和中部农业碳排放绩效都呈现出不同的发展趋势，其差距不可能在自然状态下保持一个均衡变化路径。

显然，在对东部地区的检验中，3 个检验结果都能拒绝原假设，表示东部地区农业碳排放绩效表现出随机性收敛特征，从绩效值来看，东部的省市平均绩效很高，虽然各省市的绩效表现出细小的波动，但大体趋势都比较稳定。

接下来观察对西部地区的检验结果，LLC 检验接受原假设，ADF-Fisher 和 PP-Fisher 分别在 1%和 5%的显著水平下拒绝原假设，同样根据少数服从多数原则，西部地区农业碳排放绩效存在随机性收敛。

最后是对中部地区的随机性趋同检验，3 种方法均能在 1%的显著性水平下拒绝原假设，表明面板数据不存在单位根。虽然中西部区域一些省市在个别年份出现了异常值，比如四川省 2003 年和 2004 年的绩效值突然升至 1.000，新疆 2010 年的绩效值也由 0.470 变成 1.000，但这些省市的绩效随后都回到了各自的稳定值，区域内部省市间的差距变化路径能保持平稳，中部地区的农业碳排放绩效存在随机性收敛。

2.3.3　总量和绩效随机性收敛检验结果的对比分析

对总量和绩效的收敛检验结果既存在相似之处，也有一些区别：

1)全国农业碳排放总量和绩效均不存在随机性趋同现象，而表现为一种随机性分异的过程。也就是说，我国地区间农业碳排放量和绩效的差异在不断拉大，这种差距并不是短期性的，而是会长期存在，并且不会自动消失，这可能是由于各省市之间农业生产方式和能源消费存在较大差异。

2)将 3 个区域各自作为整体进行随机性收敛检验时，东部地区的农业碳排放量和绩效都存在随机性收敛，是由于我国东部拥有最新农业技术和大量资金投入，相对于中西部地区，不仅农业碳排放量较少，还有利于在农业生产环节推动碳减排，在农业发展过程中也更加注重资源和环境的保护，大大降低了碳排放水平，发展方式相对较为持续，平均绩效较高，属于高绩效低碳排俱乐部；中部和西部地区的农业碳排放量呈现发散趋势，但绩效存在俱乐部式随机性收敛，中西部受地形地势和农业科技水平的限制，农业经济发展方式较为粗放。从整体上看，农业碳排放量多且省市间差异明显，绩效值也处于低水平，但区域内部的绩效情况存在一定程度的趋同现象，可这并不意味着农业碳排放绩效改善，而是向低水平的趋同表现，中部和西部两个区域都属于低绩效高碳排俱乐部。

3)据实际情况推测，总量与绩效的收敛结果存在差异可能是由于：传统的区域划分方式综合了多个因素，在中国三大区域内，经济发展初始条件、自然环境条件、产业结构、发展基础等多个方面大体相似，即使区域内各省市的农业生产方式有差异，但农业碳排放绩效的评价指标包括多个方面，三大区域内的绩效总体能呈现出各自的收敛特征；而农业碳排放总量仅仅是一个指标，相对于综合考虑多个指标的绩效， 总量出现收敛的要求更为严苛，所以区域内的农业碳排放量差异明显，不能保持平稳的变化路径。

3　结论与建议

3.1　结论

1)2000—2014 年间，全国平均农业碳排放量呈

现递增趋势，其中，除东部农业碳排放总量均值逐渐下降外，西部和中部的碳排放量均呈现增长趋势，且中部环比增长速度、年均增长速度均为最大，其每年的农业碳排放总量均值都要远远大于全国、东部和西部，差距未见有缩小趋势。

2)从测算的绩效结果来看，东、中、西部之间的农业碳排放绩效也存在明显差异，差距格局基本保持稳定。全国和东部的农业碳排放绩效分别在 0.6 和 0.8 上下小幅度波动，中部和西部绝大多数年份的绩效都处于 0.3~0.5。3 个区域中，东部地区绩效一直遥遥领先，西部农业碳排放绩效的起点最低，但在渐渐改善，而中部绩效起点处于东部和西部之间，近几年已降至末位。

3)在对总量和绩效分别进行随机性收敛检验后，发现两者结果有相似也有差异。总量方面，从全国范围而言，总量不表现出收敛，且各省市差距不断扩大，东部地区存在随机性收敛，中部和西部地区呈现发散趋势。绩效方面，全国呈显著发散，但东部、中部和西部各区域内存在俱乐部式随机性收敛，这表明，中国农业碳排放绩效不会自动降低到一个稳态水平，东、中、西各省市能收敛于 3 个不同的稳态，但区别于东部绩效的高水平趋同，中、西部区域属于向低绩效趋同的俱乐部。

3.2 建议

根据以上结论，本文提出以下建议：

1)落实农业碳排放总量控制，并因地制宜。由于空间差异明显，在制定区域农业碳减排政策时，不应用划一的方式一律处理，而应立足于当地实际，设立差别化的减排目标，从农业碳排放各类源头入手，控制排放量，对农业碳排放量过高的地区(如湖南、河南、四川等地)制订严格的减排任务，并积极引进农业碳减排技术，最终实现农业碳减排。并且，经计算发现有部分省市反刍动物肠道发酵和粪便处理产生的碳排放占到了农业碳排放总量的一半，大量的牲畜粪便得不到有效处理，导致了过多的碳排放，故应加强牲畜粪便管理。种植业方面，除化肥外，农膜带来的碳排放也不可忽视，但有部分地区甚至还在推广农膜的使用，在甘肃省和新疆等地区，农膜贡献的农业碳排放超过总量的 20%，这些地区可采取机械化覆膜、捡膜的方式减少农膜残留造成的碳排放。

2)根据各区域农业碳排放绩效的差异性采取差异化的农业生产方式。东部地区绩效相对较高，需在保持高绩效的基础上继续优化生产资料配置，争取整体向生产前沿面靠拢。由于中部和西部分布着许多农业大省，农业碳排放难免较多，非期望产出过量导致绩效偏低，但同样是农业大省的山东省农业碳排放绩效为 1.000，说明生产资料投入的配置非常有效，不存在冗余现象，可以为其他农业大省的绩效改进做出示范：从投入角度而言，西部地区如贵州、云南、青海、甘肃等属于我国的欠发达地区，农村劳动力转移速度较慢，第一产业从业人员较多，且素质相对偏低，容易出现劳动力投入冗余现象。化肥是农业生产的基本投入，然而在部分省市，化肥导致的碳排放量占农业碳排放总量的 30%以上，过多的化肥投入会导致农业碳排放绩效损失，这要求实现从无机肥使用向有机肥方向转变，并结合各省农用土地的性质，积极探求新型化肥施用方式，提高农作物的化肥吸收效率。

3)通过政策干预尽早实现农业碳排总量和绩效的区域随机性收敛。尽管希望农业碳排放的绩效和总量能在未来表现出随机性收敛特征，但从长期看，全国范围内的差异仅依靠自然本身是不能实现收敛的，不管是总量还是绩效，各省市间差距都不会无条件地自动消失，有必要进行相关政策干预。区域范围内，东部地区的农业碳排放总量控制良好，对于中部和西部地区的农业碳减排活动，政府和相关部门需给予物质和技术支持，但由于各地区资源禀赋、发展基础等都存在显著差异，要达到总量收敛的目标十分困难。3 个区域内部，农业碳排放绩效差异较小，可以考虑制定区域间有差异而区域内统一的农业碳排放绩效优化政策，能一定程度上减少政策制定成本，通过加大减排资金投入力度、引入先进技术、提高生产资料配置效率等手段，有望缩小区域间农业碳排放绩效的差距。

参考文献 References

[1] 李波，张俊飚，李海鹏．中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]．中国人口•资源与环境, 2011, 21(8): 80–86
Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80–86

[2] Strazicich M C, List J A. Are CO_2 emission levels converging among industrial countries?[J]. Environmental and Resource Economics, 2003, 24(3): 263–271

[3] Westerlund J, Basher S A. Testing for convergence in carbon dioxide emissions using a century of panel data[J]. Environmental and Resource Economics, 2008, 40(1): 109–120

[4] Lee C C, Chang C P. New evidence on the convergence of per capita carbon dioxide emissions from panel seemingly unrelated regressions augmented Dickey-Fuller tests[J]. Energy,

2008, 33(9): 1468–1475
[5] 许广月. 碳排放收敛性: 理论假说和中国的经验研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2010, (9): 31–42
Xu G Y. The convergence in carbon dioxide emissions: Theoretical hypotheses and empirical research in China[J]. The Journal of Quantitative and Technical Economics, 2010, (9): 31–42
[6] 高广阔, 马海娟. 我国碳排放收敛性: 基于面板数据的分位数回归[J]. 统计与决策, 2012, (18): 25–28
Gao G K, Ma H J. China's carbon emissions' convergence: Based on the quantile regression of panel data[J]. Statistics and Decision, 2012, (18): 25–28
[7] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于 Malmquist-luenberger 指数与空间计量的实证分析[J]. 经济地理, 2015, 35(4): 142–148
Gao M, Song H Y. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance[J]. Economic Geography, 2015, 35(4): 142–148
[8] 杨秀玉. 中国农业碳排放的地区差异与收敛性分析[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(4): 1066–1072
Yang X Y. Regional differences and convergence of agricultural carbon emissions in China[J]. Hubei Province Agricultural Science, 2016, 55(4): 1066–1072
[9] 程琳琳, 张俊飚, 曾杨梅, 等. 中国农业碳生产率的分布演进与空间俱乐部收敛研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(7): 121–132
Cheng L L, Zhang J B, Zeng Y M, et al. Analysis on the dynamic evolution and spatial club convergence of national agricultural carbon productivity[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(7): 121–132
[10] Tsionas E G. Another look at regional convergence in Greece[J]. Regional Studies, 2002, 36(6): 603–609
[11] Evans P, Karras G. Convergence revisited[J]. Journal of Monetary Economics, 1996, 37(2): 249–265
[12] Bernard A B, Durlauf S N. Interpreting tests of the convergence hypothesis[J]. Journal of Econometrics, 1996, 71(1/2): 161–173
[13] Quah D. Galton's fallacy and tests of the convergence hypothesis[J]. The Scandinavian Journal of Economics, 1993, 95(4): 427–443
[14] 吴贤荣, 张俊飚, 田云, 等. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 129–138
Wu X R, Zhang J B, Tian Y, et al. Provincial agricultural carbon emissions in China: Calculation, performance change and influencing factors[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 129–138
[15] 田云, 张俊飚, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097–2105
Tian Y, Zhang J B, Li B. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects[J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2097–2105
[16] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1/3): 217–232
[17] IPCC. Climate Change 2007: The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: Cambridge University Press, 2007
[18] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口•资源与环境, 2012, 22(7): 21–27
Min J S, Hu H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21–27
[19] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498–509
[20] Tone K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks based measure (SBM) approach[R]. Tokyo: GRIPS Research Report Series, 2003
[21] 王兵, 吴延瑞, 颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J]. 经济研究, 2010, (5): 95–109
Wang B, Wu Y R, Yan P F. Environmental efficiency and environmental total factor productivity growth in China's regional economies[J]. Economic Research Journal, 2010, (5): 95–109
[22] 王金田, 王学真, 高峰. 全国及分省份农业资本存量 K 的估算[J]. 农业技术经济, 2007, (4): 64–70
Wang J T, Wang X Z, Gao F. An estimation on capital assets K in agriculture in all provinces, autonomous regions and four municipalities[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2007, (4): 64–70
[23] Carlino G A, Mills L. Are U. S. regional incomes converging? A time series analysis[J]. Journal of Monetary Economics, 1993, 32(2): 335–346
[24] Carlino G A, Mills L. Testing neoclassical convergence in regional incomes and earnings[J]. Regional Science and Urban Economics, 1996, 26(6): 565–590